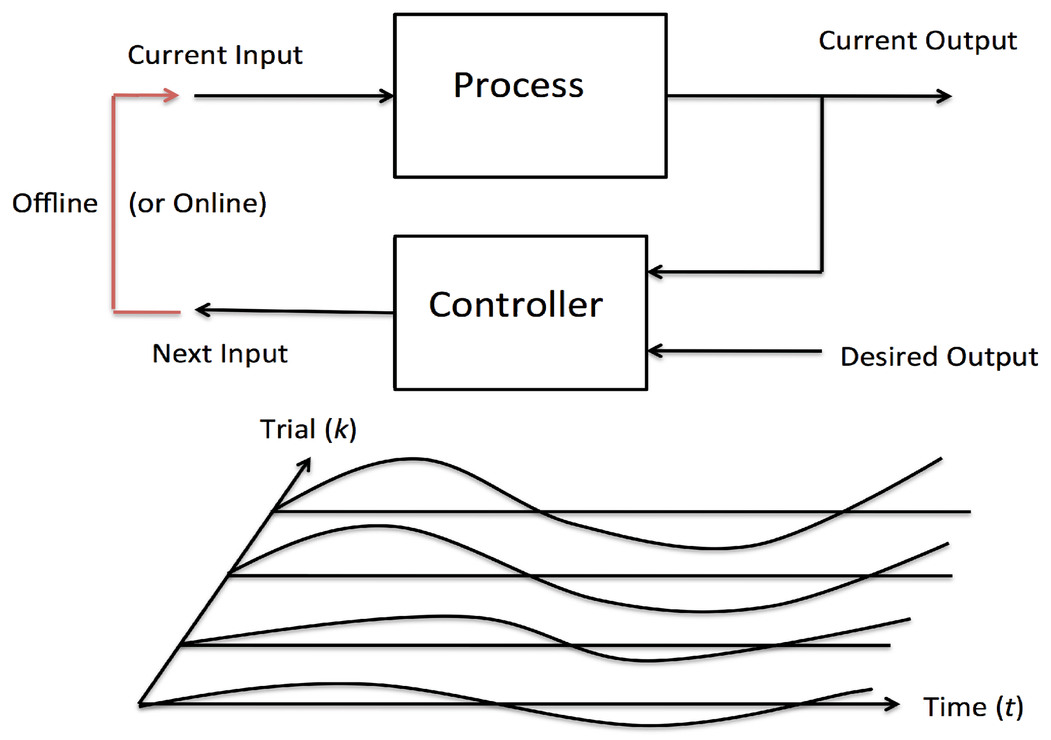
システム制御理論の研究 〜 統計科学と制御科学の接点

宮里　義彦　数理・推論研究系　教授

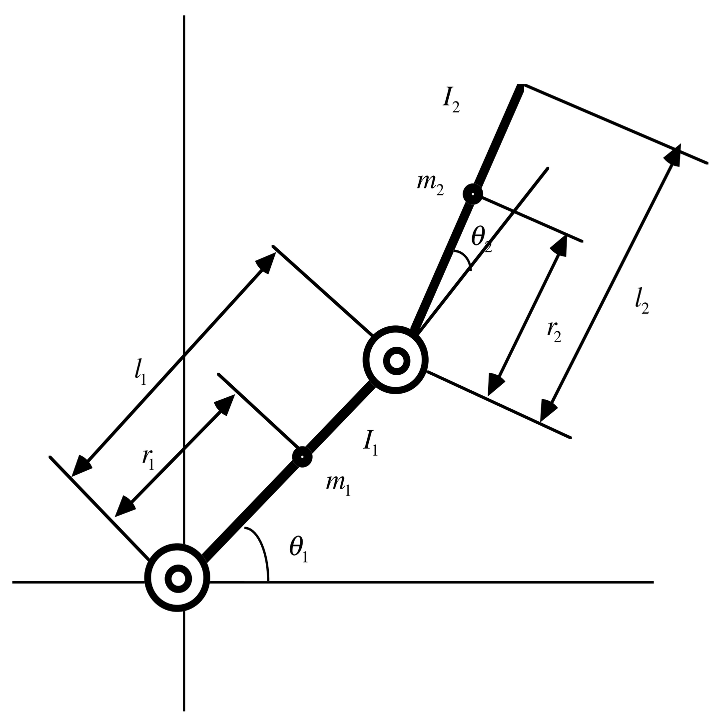
【ハイブリッド型適応機構を用いた反復学習制御】

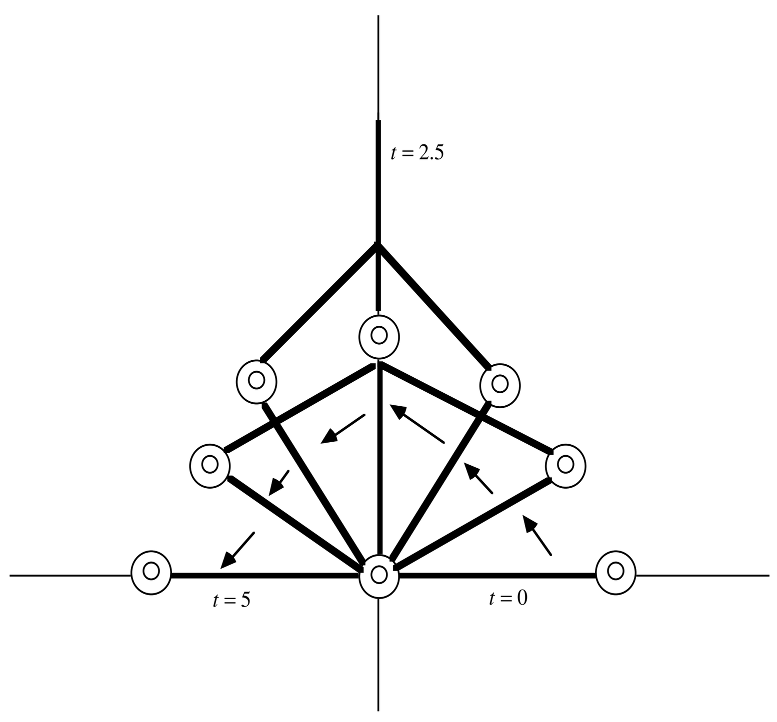
未知の制御対象に対して限られた事前情報のもとで追従制御を実現する手法の1つに反復学習制御がある．これは有限時間区間の上で規定された試行を繰り返す過程で，追従制御を実現する入力を逐次的に生成する手法であり，これまでに多くの研究結果がある．

これに対して本研究では，未知のロボットマニピュレータ（機械システム）に対してハイブリッド型適応機構を用いて反復学習制御を実現する方式を提案する．ハイブリッド型適応機構とは，制御は連続時間形式で実行されるのに対して，調整パラメータの更新は離散時間的に行われる適応制御の形式である．提案する方式では，現在の試行時の制御結果に基づいて更新された調整パラメータが，次の試行時の制御パラメータとして用いられる．この試行ごとのパラメータの更新と，H_∞制御問題から導出された安定化信号により，全ての状態変数が有界となり，試行を繰り返す過程での追従誤差の0への収束が達成される．この提案した手法の利点は，未知のシステムに適用できる点と，追従する目標信号やその信号が規定される有限時間区間の長さが，試行ごとに異なってもよいという点であるが，これは提案手法のパラメータ推定機構によるものである．ハイブリッド型適応機構の観点から反復学習制御をとらえることで，様々なハイブリッド型適応則の適用により，収束特性の異なる種々の反復学習制御方式を導出することができる．



Iterative Learning Control





Robotic Manipulator　　Trajectory Control

表 1. ロボットマニピュレータ（機械システム）

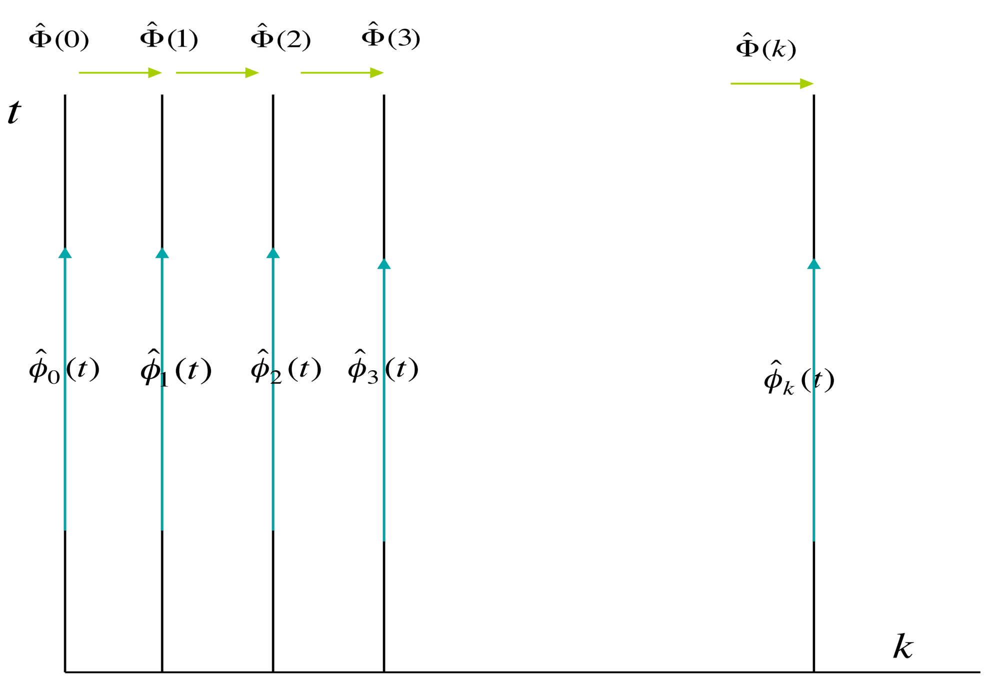
n自由度のロボットマニピュレータ（機械システム）
$M(\theta)\ddot{\theta}+C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta}+G(\theta)=\tau$ $\theta\in\mathbf{R}^n$：位置（関節角度）；　$M(\theta)\in\mathbf{R}^{n\times n}$：慣性行列 $C(\theta,\dot{\theta})\in\mathbf{R}^{n\times n}$：遠心力・コリオリ力項 $G(\theta)\in\mathbf{R}^n$：重力項 τ：入力トルク (制御入力)
未知パラメータΦに関する線形回帰式
$M(\theta)a+C(\theta,\dot{\theta})b+G(\theta)=\Omega(\theta,\dot{\theta},a,b)^{\mathsf{T}}\Phi$ $\Omega(\theta,\dot{\theta},a,b)$：$\theta,\dot{\theta},a,b$について既知の（非線形）関数
ロボットマニピュレータ（機械システム）の追従制御
$\tau=\Omega(\theta,\dot{\theta},a,b)^{\mathsf{T}}\hat{\Phi}-e+v$ $a\equiv\ddot{\theta}_d+\lambda^2 e-\lambda s,\quad b\equiv\dot{\theta}_d-\lambda e$ $e\equiv\theta-\theta_d$　（追従誤差） $s\equiv\dot{e}+\lambda e\quad(\lambda>0)$　（追従誤差） $\hat{\Phi}$：未知パラメータ Φの推定値 v：安定化信号

表 2. ハイブリッド型適応機構を用いた反復学習制御

k回目の試行時の制御入力 $\tau_k(t)$
$\tau_k(t)=\Omega_k^{(a,b)}(t)^{\mathsf{T}}\hat{\Phi}(k)-e_k(t)+v_k(t)$ $\Omega_k^{(a,b)}(t)\equiv\Omega(\theta_k(t),\dot{\theta}_k(t),a_k(t),b_k(t))$ $v_k(t)=-\left(K+\alpha\cdot\Omega_k^{(a,b)}(t)^{\mathsf{T}}\Omega_k^{(a,b)}(t)\right)s_k(t)$ $(K=K^{\mathsf{T}}>0,\quad\alpha>0)$
マニピュレータ（機械システム）の動的モデルと同定モデル
$\tau_k(t)=M(\theta_k)\ddot{\theta}_k+C(\theta_k,\dot{\theta}_k)\dot{\theta}_k+G(\theta_k)=\Omega_k^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)^{\mathsf{T}}\Phi$ $\hat{\tau}_k(t)=\Omega_k^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)^{\mathsf{T}}\hat{\Phi}(k)$ $\Omega_k^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)\equiv\Omega(\theta_k(t),\dot{\theta}_k(t),\ddot{\theta}_k(t),\dot{\theta}_k(t))$
ハイブリッド型適応機構(同定誤差$\epsilon_k(t)$によって駆動)
$\hat{\Phi}(k)=\hat{\Phi}(k-1)$ $\quad-\left\{\Gamma(k-1)^{-1}+\int_0^T\Omega_{k-1}^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)\Omega_{k-1}^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)^{\mathsf{T}}dt\right\}^{-1}\cdot$ $\quad\cdot\int_0^T\Omega_{k-1}^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)\epsilon_{k-1}(t)dt$ $\epsilon_k(t)=\hat{\tau}_k(t)-\tau_k(t)$ $\Gamma(k)^{-1}=\lambda_1(k)\Gamma(k-1)^{-1}+\lambda_2(k)\int_0^T\Omega_{k-1}^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)\Omega_{k-1}^{(\ddot{\theta},\dot{\theta})}(t)^{\mathsf{T}}dt$ $0<\lambda_1(k)\le 1,\quad 0\le\lambda_2(k)<2$

【ハイブリッド型適応機構を用いた反復学習制御〜2次元適応制御の応用】

適応型の反復学習制御の発展版として，オフラインチューニングとしてのハイブリッド型適応機構に各試行時において新たにオンラインチューニングも加えて両者を併用する２次元適応制御方式について提案する．この２次元適応制御方式は2次元システムの適応制御方式の一つとして考案されたものであるが，試行を繰り返すごとに適応制御の制御環境が適応的に改善されていく性質を持ち，その意味で高度の学習制御過程のモデルとしても捉えることができる．



2-Dimensional Adaptive Control

表 3. 2次元適応制御

制御入力の構成
$\tau_k(t)=\Omega_k^{(a,b)}(t)^{\mathsf{T}}\{\hat{\Phi}(k)+\hat{\phi}_k(t)\}-e_k(t)+v_k(t)$ $v_k(t)=-\left(K+\alpha\cdot\Omega_k^{(a,b)}(t)^{\mathsf{T}}\Omega_k^{(a,b)}(t)\right)s_k(t)$ $\dot{\hat{\phi}}_k(t)=-G_k\Omega_k^{(a,b)}(t)s_k(t)\qquad(\hat{\phi}_k(0)=0,\quad G_k=G_k^{\mathsf{T}}>0)$
パラメータの調整
$\hat{\Phi}(k)\Leftarrow$ハイブリッド型適応則により更新（オフラインチューニング） $\Leftarrow$同定誤差$\epsilon_k(t)$によって駆動 $\hat{\phi}_k(t)\Rightarrow$連続時間調整（オンラインチューニング） $\Leftarrow$追従誤差誤差$s_k(t)$によって駆動 各試行時の最初にリセット ($\hat{\phi}_k(0)=0$)
2次元適応制御の性質
⋆ 2つのタイプの適応機構の協調動作（オフラインとオンライン） ⋆ 各試行時の適応過程がもう一方の適応機構により改善 （適応過程の適応的改善） ⋆ 本来は2次元システムの適応制御の一手法として考案 $\Rightarrow$ハイブリッド型適応機構による反復学習制御への応用